

近年の道路橋の震災経験から学ぶ

— 構造リダンダンシーと機能回復力の向上を目指して —

星隈 順一*

2008年岩手・宮城内陸地震、2011年東北地方太平洋沖地震および2016年熊本地震では、地震動の影響に対してはこれまでの橋に対する耐震対策が一定の効果を発揮したことが確認されたが、一方で、津波の影響あるいは地盤変状の影響により橋に致命的な被害が生じるに至った。本稿では、これらの近年の地震による道路橋の被災とそこから得られる教訓を振り返るとともに、2016年熊本地震で被災したPCラーメン橋の震災復旧工事での現場経験を踏まえ、想定を超える事象に対する対策について、橋の構造リダンダンシーや機能回復性の向上という観点から概述した。

キーワード：道路橋、震災経験、構造リダンダンシー、機能回復力

1. はじめに

わが国の道路橋の耐震技術に関する研究開発は、過去の大地震におけるさまざまな被災経験を踏まえながら産官学の幅広い分野で進められ、そしてこれらの震災経験から得られた教訓や耐震設計技術に関する研究開発の成果などが技術基準類の改定などを通じて橋の設計や補強対策にフィードバックされてきているところである。わが国では最近10年を振り返っただけでも、2008年岩手・宮城内陸地震、2011年東北地方太平洋沖地震、2016年熊本地震などの大地震が発生しているが、1995年兵庫県南部地震の震災教訓を踏まえてこれまで実施されてきている地震動に対する耐震対策については一定の効果を発揮してきていると考えられる。

一方で、これら近年の大地震では、地震動の影響だけでなく地盤変状または津波の影響によって橋を含めたさまざまな道路施設に甚大な被害をもたらし、地震後の国民生活に重大な影響を与えたことはまだ記憶に新しい。また、南海トラフ地震や首都直下地震のように経済や社会への影響がきわめて大きくなることが想定されている地震の発生が切迫していることも指摘されている。このような国家的な危機の状況が生じた場合でも、早期に機能を回復させることができるようにハードとソフトの両面からあらかじめ策を講じておくなど、路線としての強じん化（レジリエンスの向上）の推進が急務となっているところである。

本稿では最近10年の大地震における道路橋の被災とその教訓を振り返るとともに、著者も関与したプレストレス

トコンクリートラーメン橋の震災復旧事業を事例にしなが
ら、橋の構造リダンダンシーと機能回復性の向上について
概述したい。

2. 2008年岩手・宮城内陸地震による祭時大橋の被害から学ぶ

2008年6月14日に発生した2008年岩手・宮城内陸地震では、震源に近い国道342号にかかる祭時大橋が写真-1のように落橋する被害が生じた^{1,2)}。祭時大橋は橋長94.9m（支間長27+40+27m）、幅員9mの鋼3径間連続非合成桁橋で、1978年に竣工された橋である。地震後に実施された詳細な調査の結果、A1橋台とA2橋台のパラベット間の長さは地震後に約11m短くなっていること、地震によるA2側地盤の破壊によりA2およびP2がともにA1側へ移動し、これに伴いP1橋脚の頂部の変位が大きくなってP1橋脚が破壊し、上部構造が落下するに至ったと推定されることが報告されている^{3,4)}。

橋の設計では基礎を構築する周辺の地盤が大きく動かないことを前提にしており、地すべりに伴う橋台や橋脚の強制的な移動を想定してこれらに抵抗し得る耐力を橋の構造本体に求めることは合理的ではない。祭時大橋の落橋から学ぶ教訓は、道路の路線計画をする段階でこのような地形・地質条件にある地点では橋の計画を避けるべきであるという点である。すなわち、地すべり地形が分布している地震時に地すべりが生じやすいような地形条件において道路の路線計画を行う際には、計画の段階から面的に幅広い調査を行って地質構造などの評価を行い、地盤の不安定化の可能性についてとくに慎重に検討したうえで、路線の位置と橋として計画する区間を設定することが重要である。地震による地すべりなどが橋に影響を与えた既往の事例の分析から、とくに注意をすべき地形・地質の条件も明らかになってきている⁵⁾。このような知見を橋の設計段階ではなく、路線の計画や調査の段階で活用することが重要である。

なお、写真-2は架け替えられた新しい祭時大橋である。橋の構造は橋長が115mの2径間連続PCラーメン箱桁橋であり、当初の架橋地点から約150m上流側に建設されている。



*1 Jun-ichi HOSHIKUMA

国土交通省国土技術政策
総合研究所 熊本地震復旧
対策研究室 室長



写真 - 1 国道 342 号祭時大橋の落橋



写真 - 2 約 150 m 上流側に架け替えられた祭時大橋



写真 - 3 コンクリート上部構造が裏返しになって流出



写真 - 4 コンクリート上部構造が裏返らずに流出



写真 - 5 下部構造の損壊を伴って上部構造が流出



写真 - 6 津波が桁の高さまで達したが流出していない橋

3. 2011 年東北地方太平洋沖地震における津波の影響による橋の被害から学ぶ

3.1 津波が橋に及ぼした影響

2011 年 3 月に発生したマグニチュード 9.0 の東北地方太平洋沖地震では、東北地方から関東地方にかけての広い地域で兵庫県南部地震での神戸の地震動と同等もしくはそれを超えるような強い揺れが生じた⁶⁾。このような強い地震動の影響に対して落橋に至ったのは古い耐震基準で設計されたパイルベント橋脚を有する橋だけであり、耐震補強をしていた橋については一定の性能を発揮したと考えられる。しかしながら、地震の後に発生した津波の影響により多くの橋が流出し、結果的に道路としての機能が果せない状態となった。

写真 - 3 ～ 5 は津波の影響を受けたコンクリート橋を対象として桁の流出に至った例、写真 - 6 は津波が橋桁の高さまで到達したが流出は免れた橋の例である。津波の

影響による橋への荷重効果は複雑と考えられるが、このように橋の最終的な破壊モードはさまざまであることが分かる。そこで、橋桁の高さまで津波が到達したとみられる道路橋 202 橋を対象とし、上部構造形式や支承部の構造条件と上部構造の流出との関係について整理した結果が表 - 1 である⁷⁾。これからは、特定の構造条件の橋のみに流出する被害が多いというような特徴的な傾向は認められない。

東北地方太平洋沖地震では津波の影響によって道路橋だけでなく沿岸部に存していたさまざまな施設に甚大な被災が生じた。地震のような自然由来の現象はそもそも外力特性そのものの不確実性が大きく、設計で想定する作用の状況を設定したとしても、その設定を超える作用の状況が生じ得ることをつねに考えておく必要があり、その場合においても、橋の機能喪失による社会的影響を最小化できるように路線の重要度に応じた機能回復性を備えもった構造としておくことが重要である。東北地方太平洋沖地震における津

表 - 1 津波の影響を受けた橋の構造特性の分類と被害状況

		ボックスガダー橋		桁橋		床版橋	特殊橋	合計
		鋼	コンクリート	鋼	コンクリート			
鋼製支承	流出	1	0	40	2	0	2	45
	流出しない	4	0	27	1	1	1	34
ゴム支承	流出	0	1	2	31	23	1	58
	流出しない	0	5	2	31	27	0	65
合計	流出	1	1	42	33	23	3	103
	流出しない	4	5	29	32	28	1	99



写真 - 7 迂回路の設置による応急復旧



写真 - 8 線路上への仮設盛土の設置による応急復旧



写真 - 9 応急組立橋の設置による応急復旧 (写真 7～9 提供: 国土交通省東北地方整備局)

波による被災経験を契機に、各分野でこのようなレジリエンスの強化に関する検討が始まったところである。

3.2 応急的な橋の機能回復のための措置と備え

橋の機能回復のしやすさという観点から、太平洋沿岸域を縦断する幹線道路で津波の影響を受けた国道 45 号線に架かる橋の復旧がどのように行われたのかをレビューしたい。まず、応急的な機能回復のための措置方法である。たとえば、バイパスとして整備された区間に架かる橋では、旧道の活用や仮設道路の工事により迂回路が設置された(写真 - 7)。鉄道の跨線橋では線路上に仮設盛土を敷設することにより応急的な機能回復が図られた(写真 - 8)。また、橋台の背面土が広く流出した橋、流出した上部構造の橋長が短い橋では応急組立橋の設置(写真 - 9)、河口部に近い橋のように橋長が長く複数径間の渡河橋で迂回路の設置が困難な場合は仮橋を設置(写真 - 10)するなど、個々の架橋位置の条件や資機材の搬入条件などに応じて最速に応急的な機能回復が可能な措置方法が選定された。写真 - 9 に示す 3 橋の応急復旧の事例では、応急組立橋の活用により地震発生から 8～24 日後には車両が通行できる状態とすることができている。現場で作業に着手してからの所要日数で見れば 2～10 日間である。また、写真 - 10 に示す橋長がおよそ 180 m 程度の仮橋についても、厳しい施工条件の中、地震発生から 3～4 ヶ月後に完成している。

このように津波の影響に対して橋の機能回復性を高める観点から見ると、応急組立橋による架橋技術や仮橋の急速

施工技術が復興に貢献したことは特筆すべきことである。南海トラフなどの将来の大地震に対する機能回復性を高める観点からは、大型土嚢と敷鉄板の組合せのような簡易な工法から応急組立橋や仮橋のような工法など、適材適な応急橋の急速施工技術を発展させていくことも重要である。

3.3 地域防災計画と整合させた橋の計画

東北地方太平洋沖地震以降、津波の影響に対する橋への作用効果に関する研究が多方面で実施されてきた。そのようななかで課題となったのは、東北地方太平洋沖地震で発生したようなきわめて大きな津波からの作用に対して橋の設計基準としてどう考えるのかという点である。東北地方太平洋沖地震で発生した津波による道路橋の被災を見ると、津波の高さが上部構造の高さにまで達していない場合には、津波による上部構造の流出などの致命的な被害は確認されていない。したがって、橋の架橋地点において考慮する津波高さに応じて橋桁の高さを設定することは計画段階で講じておく一つの考え方である。

一方、この議論のなかで重要であったのは、津波の影響に対して橋だけで対応を図ろうとするべきではなく、津波に対する地域の防災計画と一体となって対策が講じられるべきであるという点である。道路は地震後において避難路としての役割、救援活動や復旧活動のための緊急輸送路としての役割など、路線によってそれぞれの役割があり、地域内に存する個別の路線に求められる性能は、その地域の防災計画などに基づいて設定される。したがって、その路線にある道路橋の設計においては、このようにして設定

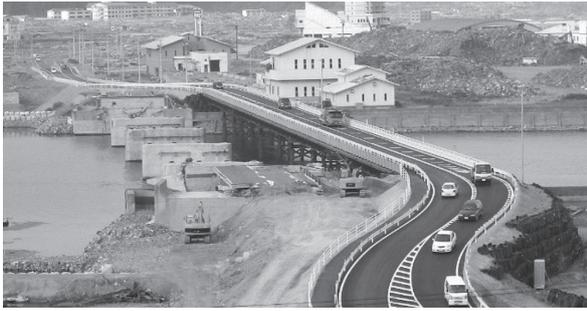


写真 - 10 仮橋の設置による応急復旧 (写真提供：国土交通省東北地方整備局)



写真 - 11 河口部の水門と連携して本復旧を計画



写真 - 12 バック堤の整備と連携して本復旧を計画

される当該路線に求められる性能に応じて、個々に適切な構造計画を検討する必要がある。その際、津波に対する他施設による防災対策との連携も重要である。地域の防災対策として河川堤防の嵩上げが計画されれば、当然のことながら当該河川を渡河する橋もそれに応じた縦断設計をすることになる。また、河口部に水門の計画がなされれば、その計画に応じた上流側の防災計画も定まってくる。このように、津波の浸水が想定されている地点に架橋する橋においては、橋単独で構造計画が決定できることはないという点に注意する必要がある。

写真 - 11 および写真 - 12は、写真 - 10に示した国道45号線の橋の架替え工事の状況である。これらの橋の架替えでは、路線の重要度とともに個々の架設地点周辺の地域防災計画を踏まえ、バック堤、防潮堤あるいは河口に設けられた水門のような橋以外の津波対策施設と連携したうえで、橋が津波の影響を受けにくくなるように計画されている。

4. 2016年熊本地震による阿蘇長陽大橋の被害とその復旧から学ぶ

4.1 阿蘇長陽大橋の被災の概要

2016年熊本地震においても、兵庫県南部地震以降の技術基準に基づいて設計された橋、それ以前に設計された橋でも耐震補強が実施されていた橋については、そのほとんどの橋において求められた性能を発揮できている状態であった⁸⁾。土木学会の平成28年熊本地震・会長特別調査団による調査でも、阪神淡路大震災などの過去の地震被害を教訓に耐震設計基準の改定、耐震補強などを進めてきた成果が着実に効果をあげていると報告されている⁹⁾。一方で、地盤変状の影響により下部構造自体が大きく移動して橋に甚大な被害を及ぼす事例が多く生じたことは特徴的であった⁸⁾。ここでは、熊本地震による被災のなかから南阿蘇村

に架橋されているPCラーメン橋である阿蘇長陽大橋の事例をとりあげ、その復旧工事の一連のプロセスを通じて機能回復性の観点から今後の設計の参考になると感じた事項を紹介する。

阿蘇長陽大橋は橋長が276mの4径間連続PCラーメン箱桁橋であり、昭和55年道路橋示方書に基づいて設計された橋である。熊本地震による斜面崩落に伴い、写真 - 13のようにA1橋台の鋼製支承が破壊して橋台が約2m沈下するとともに、橋台の直下だけでなく、橋台に接続する道路も斜面崩落で損傷を受けた。また、地震の影響により中空断面RC橋脚やPC箱桁にもひび割れが生じた。とくに、P3橋脚の中間高さで確認されたひび割れには、コンクリート壁を貫通して中空断面の内面側にまで達しているものがあつた。

4.2 阿蘇長陽大橋の復旧の概要

A1橋台の復旧では、斜面変状のリスクを抑えるため、地質調査で特定した亀裂などを有するゆるんだ地盤は除去したうえで、現地でも確認しながら支持層位置を設定した。また、周辺の斜面変状により仮に橋台前面の支持地盤が再び崩落するような状況となった場合でも、べつ支持機構により自立ができるように多点支持のラーメン構造によりアプローチ区間を再構築した。その際、ラーメン構造の背面側はゆるみが確認された範囲の外側の位置まで伸ばすとともに、ハンチを含めて構造リダンダンシーが発揮できるように十分に配慮した。さらに橋台前面の斜面についても、再度の崩落のリスク抑えるためアンカーなどによる斜面対策を併せて実施した。

断面内面側にまでひび割れが貫通した中空断面のP3橋脚については、当初の状態からコンクリートによるせん断抵抗機能が失われている状態と考えられることから、本橋脚の復旧では中空部に流動性の高いコンクリートを充填し



写真 - 13 阿蘇長陽大橋と熊本地震による主な被災状況



写真 - 14 張出し架設工法により施工されたPC ラーメン橋の構造リダンダンシーの発揮に役割を資した支承の破壊

てせん断抵抗機能を回復させることとした。その際、既設コンクリートと充填コンクリートの一体化を高めるため、貫通ひび割れが生じている断面周辺には水平方向の鉄筋を配置することとし、内面側のコンクリート壁にあと施工アンカーによりアンカー筋を定着させた後にコンクリートを充填した。

なお、復旧方法に関する詳細については参考文献を参照いただきたい^{10, 11)}。

4.3 被害状況の早期点検のための配慮

本橋の復旧のプロセスにおいて最初の課題は、高橋脚を有する本橋に生じている被災状況の全容把握であった。本橋では橋に取り付いている前後いずれの道路も斜面崩壊の影響を受けて道路自体が崩れたり、あるいは塞がった状態となったりしたことから、詳細点検のために高所作業車や橋梁点検車のような車両が進出できなかった。このため地震直後の調査は、徒歩による人力で現場へ搬入し得る調査機器など（UAV や画像解析用のカメラなど）によりできることにかぎられたため、まずはそれらの機器により概況の把握を行った。次に、写真 - 13 中に示しているロープアクセスによる近接目視点検を実施し、上部構造、下部構造に生じたひび割れの状態を詳細に調査した。この調査の段階においては、橋脚の外面側に地震の影響によってひび

割れが生じていることを確認できたが、中空断面の構造であり、復旧方法を検討するうえではそのひび割れが内面側にまで貫通した状態となっているかどうかを確認する必要がある。ただ、中空断面 RC 橋脚には鋼製橋脚や箱桁断面の上部構造に具備されているマンホールが設置されていないため、物理的に内面側の状態を確認することができない。そこで、箱桁端部のマンホールから箱桁内部を通して P3 橋脚の柱頭部へアクセスし、柱頭部の既設鉄筋を避けた位置に下向きの小さな孔を設け、そこから小型カメラと光源を降下させて内面側の状態を調査した。そして、これらの調査の結果を重ね合わせることで、中空断面 RC 橋脚の外面に生じていたひび割れが内面側にまで貫通している状態であることを確認することができた。

この経験からいえるのは、機能回復性を向上させるためには、まずは地震後早期に橋の損傷状態を把握できるように設計の段階からあらかじめ検討しておくのがよいという点である。とくに、阿蘇長陽大橋のように V 字谷を跨ぐ高橋脚を有する橋の場合には、桁下の部位や橋脚にアクセスして近接目視することが地震後すぐには実施できない場合が想定される。このため、橋の重要度、立地条件、構造条件などに応じて、地震後の緊急点検をどのように実施するかを設計の段階から検討しておき、その実施方法に応じ

て設計または施工の段階であらかじめ配慮しておくことが合理的なことについては、その配慮を施しておくのが望ましいと考えられる。たとえば、ロープアクセスによる緊急点検がより迅速かつ効率的に実施できるよう、ロープのガイドなどのために橋脚側に設置が必要となるインサートについては、橋脚を建設する段階で先施工しておけば、ロープにぶら下がった状態での作業員の効率が上がり、作業工程も短縮することができる。また、中空断面 RC 橋脚の場合、必要な状況となった際に内面側の状態を点検することができるように、設計の段階において適切な箇所に点検孔を設けた構造としておくとともに、外面側のひび割れとの位置関係が把握しやすくなるように、内面側に高さや向きが分かるスケールなどを施工段階で表示しておくなどの配慮をしておくのがよいと考えられる。

地震後の迅速な橋の状態把握に資する配慮や工夫は、橋の構造条件に応じてさまざまあると考えられる。このような設計や施工の段階での配慮や工夫が多く現場で検討され、そしてそれらが蓄積され共有されていくことを期待したい。

4.4 地盤変状に対する構造リダンダンシーの確保

本橋では A1 橋台周辺の斜面崩落により A1 橋台自体が約 2 m 沈下する状態となった。このような被害からも、そもそも橋台の設置位置を検討する段階において斜面崩壊の影響を受けないように選定することの重要性が改めて明らかとなったところである。

一方で、今回の橋台の沈下という被害は橋本体の構造リダンダンシーの観点からも重要な示唆を与えている。それは、橋台が約 2 m 沈下するような状況になっても PC 箱桁の上部構造は崩落という致命的な事態には至っていないという点である。これには 2 つのポイントがある。一つ目は、A1 橋台の沈下に伴い橋座に設置されていた支承の破壊が先行して上下部構造が分離したことにより(写真-14)、結果的に PC 箱桁に伝達される力が頭打ちとなったこと、二つ目は、P1～A1 の径間が張出し架設工法により施工されていたため、A1 橋台での支点支持機能が喪失したとしてもこの径間は P1 橋脚と一体となって自立できる構造特性であったことである。建設当時の設計段階においてこのような破壊シナリオを想定していたということではないと思われるが、設計で想定する状況を超えるような状況に対しても構造リダンダンシーが確保される橋を目指していく観点からは、この破壊形態は有用な情報を発している事例といえる。

橋の計画においてはそもそも地盤変状の影響を受けないように計画することが標準であるが、そのような計画がどうしても困難な場合もあり得る。そのような場合における橋の構造計画においては、構造リダンダンシーが得られるような形式を選定し、その構造特性や機能回復のための措置内容を考慮して最終的に破壊を生じさせる部位と最後まで守る部位を明確にしたうえで、意図した破壊形態となる信頼性を高めながら損傷の制御をすることが重要である。津波の影響を受ける橋に対しても同様な考え方をあてはめることができると考えられ¹²⁾、今後、このような橋の損傷制御に関する研究開発を進展させていく必要があると考

えている。

5. おわりに

本稿では近年の大地震による道路橋の被災とその教訓を振り返るとともに、熊本地震からの PC ラーメン橋の復旧工事を通じて得た現場経験を踏まえ、橋の構造リダンダンシーと機能回復性の向上について今後必要な研究開発の内容を含めて概述した。

災害現場に設置された著者の研究室では、これらのほかにも震災復旧後の橋の維持管理における 3 次元モデルの活用について研究を行っている。たとえば、阿蘇長陽大橋のように PC 箱桁や中空断面橋脚に生じたひび割れを補修した部材に対しては、ひび割れの位置情報、炭素繊維シートでの施工情報、漏水が確認されていた場合にはその位置情報など、ひび割れの進展や炭素繊維シートの接着状況を今後点検、診断する際に必要な情報を 3 次元モデルにより重ね合わせて見るができるようにする検討を行っている。このように、震災復旧に伴う調査や補修工事の際に得るデータをその後の維持管理の段階で活用できるような形で記録、保存していくことも、維持管理の効率化を図る i-Bridge の一環として重要な取組みになると考えており、今後この分野の研究開発が産学でも活発化していくことを期待しているところである。

参考文献

- 1) TEC-FORCE 国道 342 号祭時大橋緊急調査結果報告 (2008.6.18) : http://www.thr.mlit.go.jp/road/H20iwate_miyagi_nairikujisin/ (参照 2019-1-29)
- 2) 国土交通省国土技術政策総合研究所ほか：平成 20 年 (2008 年) 岩手・宮城内陸地震被害調査報告、国総研資料第 486 号、2008.12
- 3) 岩手県県土整備部道路環境課：国道 342 号祭時大橋被災状況調査検討委員会報告書、2009.6
- 4) 玉越隆史、生田浩一、運上茂樹、堺 淳一：2008 年岩手・宮城内陸地震により生じた祭時大橋の落橋とそのメカニズム、土木技術資料、Vol.52、No.2、pp.24-27、2010.2
- 5) 社団法人道路協会：斜面上の深礎基礎設計施工便覧、2012.4
- 6) 国土交通省国土技術政策総合研究所、独立行政法人土木研究所：平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震による道路橋等の被害調査報告、国土技術政策総合研究所資料第 814 号/土木研究所資料第 4295 号、2014.12
- 7) 星隈順一：津波が来ても流出しにくい橋を目指して～橋に及ぼす津波の影響を軽減する技術の開発～、土木研究所資料第 4292 号 (平成 26 年度土木研究所講演会講演集)、2014.10
- 8) 社会資本整備審議会道路分科会技術小委員会、第 5 回技術小委員会資料、国土交通省道路局：http://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/road01_sg_000303.html (参照 2019-1-29)
- 9) (公社)土木学会：平成 28 年熊本地震・会長特別調査団調査報告、2016.5
- 10) 辻 芳樹、星隈順一、荒牧 聡、平原慎也、宇土 力、三原真一：熊本地震で被災した阿蘇長陽大橋の復旧、橋梁と基礎、Vol.52、No.11、pp.21-27、2018.11
- 11) 澤田 守、今村隆浩、中川量太、星隈順一：熊本地震で被災した PC ラーメン橋の復旧とモニタリングの活用、土木技術資料、Vol.60、No.2、pp.36-39、2018.2
- 12) 中尾尚史、森屋圭浩、大住道生、星隈順一：津波を受ける橋の機能回復力向上のための技術開発、土木技術資料、Vol.59、No.6、pp.40-43、2017.6

【2019 年 1 月 29 日受付】